

# 論文審査の結果の要旨

氏名 朱 志光

本論文は「Mechanical Properties、 Constitutive Equations、 Integrative Computational Model of Liver and their Applications in Computer Aided Surgery (肝臓の機械的性質と構成式ならびに肝臓の統合計算モデルとそのコンピュータ外科への応用)」と題し9章よりなる。変形臓器である肝臓のバイオメカニクスに関する実験的検討を行い、肝臓の非線形的な力学特性を記述する構成式を求めるとともに、3次元医用画像から患者固有の臓器形状モデルを生成する手法を提案し、それらの統合について研究している。

第1章ではブタ肝臓試験片を用いた単軸引張圧縮試験について述べている。従来の方法とは異なり同一試験片に対して引張・圧縮両方の負荷を与えて連続的に測定できる手法を考案し実験を行った。実験結果にこれまでに生体組織の構成式として報告されている種々の構成式をフィッティングし、いかなる構成式が肝臓変形をモデル化できるかを検討した。さらにこの考察に基づき対数関数と多項式でひずみエネルギーを表現する構成式を新たに提案し、よりよく実験結果を表現できることを示した。

第2章では実験結果より、肝臓が肝臓表面に対して垂直な軸を主軸とする **transversely isotropic** な異方性媒質であることを示し、第1章で示した対数関数と多項式でひずみエネルギーを表現する構成式を拡張した。

第3章では術中の手術シミュレーションに要求される計算の高速化に適した肝臓変形表現法として、短軸引張試験の結果を表現する区分線形化したひずみ-応力関係式の使用を検討している。短軸引張圧縮試験の結果を多軸の変形に適用するために、von Mises 応力

と等価ひずみを導入し、臓器変形シミュレーションに適用した。肝臓試験片のインデンテーション試験のシミュレーションと実験を行い、本手法が実験結果を再現できることを確認している。

第4章では第1章で提案したひずみエネルギーを表現する構成式の評価として、肝臓のインデンテーション試験を行い、この実験結果を提案した構成式がどの程度表現できるかを検討し、実験結果を良好に再現できることを示した。

第5章では第2章で取り扱った transversely isotropy を肝臓が示す理由として、肝臓の微細構造である肝小葉の力学特性に着目し検討を行った。肝小葉1区画を含むような  $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 2\text{mm}$  の大きさの肝臓標本を、Ringer 液中で顕微鏡にて試料変形を観察しながら圧縮試験を実施した。その結果  $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 2\text{mm}$  の試料は、 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$  程度の大きさの肝臓試験片と類似の transversely isotropic な機械的特性を有しており、肝小葉実質と結合組織をモデル化することで、肝臓の非線形特性をモデル化できるのではないかと示唆を得た。

第6章では、MRI、CT 等から得られる肝臓組織の3次元医用画像データから、患者固有の肝臓の有限要素モデルを生成するという問題に対し、ボクセルデータから滑らかな表面を有する有限要素モデルを生成する手法、分岐を含む血管系の幾何学的連続性を保持しながらモデル化する手法を提案し、血管系の幾何モデル作成ならびにカテーテルなどの管状構造物の幾何モデル作成に応用している。

第7章および第8章では以上で研究した種々のモデル化手法を統合し、近年肝臓がんの低侵襲治療法であるラジオ波焼灼術 (RF Ablation) の手術シミュレーションに応用することを検討している。

そして第9章では以上の研究全体を考察し、結論を述べている。特に本研究で取り扱わなかった肝臓組織の非線形的な粘弾性特性の取り扱いに対して、本研究の成果をどのように拡張の方向性等を展望している。

本研究は臓器変形解析の分野の研究に対して、肝臓の非線形的な力学特性を実測し得られた構成式に基づく変形解析を取り入れ、患者個々の医用画像データから得られる肝臓モデルに統合して手術シミュレーションを行うという新たな始点を導入したものと考えられる。患者個々の肝臓物性の違い、疾患による肝臓物性の変化の考慮については今後の研究が求められるが、肝臓等の変形する臓器に対する手術シミュレーションシステム研究に新たな知見を与えたものと評価できる。

本研究は佐久間、久田、陳、小林、稲田、許、西村、真弓、Anderson, Cai, Liew, Yeらとの共同研究により実施されたものであるが、その主要部分は論文提出者が主体となって研究開発、検証を行ったものであり、その寄与は十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。